

전산유체역학 배관 곡면 침식 모사를 통한 배관 실패 주기 분석

남정용 · 이용규 · 박건희 · 이권학 · 이원보[†]

서울대학교 화학생물공학부
 08826 서울시 관악구 관악로 1
 (2017년 10월 5일 접수, 2017년 10월 12일 수정본 접수, 2017년 10월 16일 채택)

Analysis of Pipe Failure Period Using Pipe Elbow Erosion Model by Computational Fluid Dynamics (CFD)

Chongyong Nam, Yongkyu Lee, Gunhee Park, Gunhak Lee and Won Bo Lee[†]

School of Chemical and Biological Engineering, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, 08826, Korea
 (Received 5 October 2017; Received in revised form 12 October 2017; accepted 16 October 2017)

요 약

2000년대 이후 대두된 안전, 환경 이슈들로 인해 안전 관리는 더욱 더 중요해졌다. 하지만 안전 관리는 많은 경험적 데이터들을 요구하므로 한계점들이 많다. 안전 분야 중 하나인 배관 안전의 경우 현재 배관을 관리하는 시뮬레이션 프로그램들이 존재하지만, 배관 내부 침식에 대해서는 데이터를 얻기 힘들어 시뮬레이션에 반영이 잘 되어있지 않은 상태이다. 이러한 문제점에서 착안해 본 연구에서는 전산유체역학(CFD)을 이용하여 배관 내부의 곡면에 일어나는 침식을 모사하였고, 계산한 침식 속도를 바탕으로 한계상태함수를 이용하여 배관의 실패 주기를 분석하였다. CFD 대상 배관의 경우 여수 산업 단지에 실제로 운영되고 있는 표본을 사용하였다. DPM (Discrete Phase Model)과 부식 모델을 이용하여 CFD 결과로 $3.093 \text{ mm} \cdot \text{yr}^{-1}$ 수치의 침식 속도를 얻을 수 있었고, 이 결과를 한계상태함수에 적용한 결과 배관에 누출(leak)을 유발하는데 14.2년, 파열(burst)을 유발하는데 28.2년이라는 실패 주기를 얻어낼 수 있었다. 이러한 과정들을 통해 배관 곡면 침식이 배관 안전 진단에 유효한 실패 모드임을 도출할 수 있었다. 본 연구는 실패 연도를 구할 수 있는 방법론들을 제시하여 데이터의 한계점을 극복하고, 배관 안전 진단에 좀 더 정밀하고 발전된 방법을 제시한 것에 대해 의의를 가진다.

Abstract – Safety management has become even more important because of the safety and environmental issues that have arisen since the 2000s. However, the safety study requires many empirical data, so there are many limitations. In the case of pipe safety, simulation programs exist, but it is difficult to get data about the pipe internal erosion of the pipe. In this study, the erosion rate of the pipe elbow was simulated using computational fluid dynamics (CFD). Also, the failure period of the pipe was calculated by the limit state function using erosion rate. In the case of CFD pipe, a sample which is actually operated in Yeosu industrial complex was used, and the geometry and mesh formation were rationalized in terms of typical fluid dynamics simulations. Using the Discrete Phase Model (DPM) and the corrosion model, the erosion rate ($3.09227 \text{ mm} \cdot \text{yr}^{-1}$) was obtained from CFD simulations. As a result of applying the erosion rate to the limit state function, we obtained the pipe failure period value, 14.2 years to trigger a leak and 28.2 years to trigger a burst. Through these processes, we concluded that pipe erosion is one of the major failure modes. In addition to the results, this study has significance for suggesting the methodology of the pipe safety study.

Key words: Pipe elbow, Erosion rate, Computational fluid dynamics, Discrete Phase Model, Erosion Model, Limit state function

1. 서 론

현대 산업에서 많은 화학 물질들의 통로로 배관이 이용되고 있다. 산업에서 이용하는 화학 물질들 중에는 인화성(Flammability)이나

독성(Toxicity)이 있는 경우가 많아 배관에 문제가 생겨 화학 물질들이 누출되게 되면 인명 피해 및 산업적으로 큰 피해를 초래할 수 있다. 이러한 위험들을 예방하기 위해 배관을 관리하고 안전성을 확보 하는 것은 중요한 문제라고 볼 수 있다[1-3].

배관에 문제가 생겨 물질의 누출(Leak) 혹은 파열(Burst)이 일어나 피해가 생기는 경우를 배관 실패(Failure)라고 한다. 배관 실패에는 타공사 사고, 지반 이동, 외부 부식 등 여러 원인이 존재하는데, 이들 각각 원인을 실패 모드(Failure Mode)라고 한다. 각 실패 모드

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: wblee@snu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

의 실패 확률은 실험과 기계공학적 지식을 바탕으로 만들어진 한계상태함수(Limit State Function)를 통해 계산해 사고를 미리 예측할 수 있다[4].

$$g = \text{resistance} - \text{load} \quad (g < 0: \text{Fail})$$

실제로 배관의 많은 실패들은 배관의 곡면(elbow)에서 일어나게 되는데, 이러한 이유는 직선 구간에서 Fully-Developed 된 유체들이 곡면을 만나게 되면 유동이 변하게 되고 이 때 유체와 같이 이동한 모래입자(Sand Particle) 등과 같은 불순물이나 기공이 배관 곡면 벽면에 힘을 가하게 되어 배관에 침식을 유발해 강도를 약화시키기 때문이다. 하지만 한계상태함수를 계산할 때 내부 곡면 침식이 고려되는 경우는 거의 없다. 외부 부식이나 다른 실패 모드 경우 관련된 데이터들을 얻기 용이하지만, 내부 곡면 침식은 배관을 직접 분해하기 전까지는 데이터를 측정하기 어렵기 때문이다. 적용되지 못한 배관 내부 곡면 침식이 실패 확률 시뮬레이션에 유의한 오차를 가져올 수 있다[5].

이러한 문제점을 해결하고자, 본 연구에서는 전산유체역학(Computational fluid dynamics, CFD) 기법을 사용하여 배관 내부 곡면 침식을 모사해 침식 속도를 계산하여 데이터의 한계성을 극복하고, 계산한 침식 속도를 한계상태함수에 적용하여 배관 곡면 침식이 배관 실패 확률에 영향을 주는 정도를 분석해 보았다.

2. 배관 내부 곡면 침식 모사

본 연구에서 CFD 모델링을 위하여 ANSYS® fluent 18.2 프로그램을 사용했다.

2-1. 배관 Geometry 작성

CFD를 진행하기 위해 가장 먼저 대상이 될 배관의 Geometry를 설정하였다. 실제로 여수 산업단지에 매설되어 있는 고압 배관의 규격과 운영 조건을 이용하여 배관의 Geometry를 작성했다. 배관 종류는 기본형인 탄소강(Carbon Steel)으로 선정하였고, 배관 내부에 흐르는 물질은 산업 단지 내부에서 많이 운반되는 액상 상태에틸렌(Ethylene)으로 선정하였다.

Geometry 작성 중 유의해야 할 부분은 곡면 이전의 배관 길이이다. 일반적인 경우에 배관의 직선 부분이 곡면에 비해서 긴 경우가 많아 곡면에 유체가 충돌할 때 대부분의 유체는 fully-developed flow 상태로 충돌하게 된다. 그러나 CFD의 배관 입구 부분에서는 속도 분포가 균일 분포(Uniform Distribution)로 대입되므로 곡면 앞부분의 배관을 충분히 길게 설정해주어 유체를 fully-developed flow 상태로 만들 필요성이 있다. 이 때의 배관 길이를 입구 길이(Entrance Length)라 하고, 이는 레이놀즈 수(Reynolds Number)와 배관 지름을 이용하여 계산할 수 있다. 현재 배관에서 흐르는 유체를

Table 1. Pipe Geometry

Geometry	Unit	Value
Pipe Diameter	[mm]	250
Entrance Length	[mm]	4731.1
Pipe Length after Elbow	[mm]	1000
Inner Radius of Elbow	[mm]	250
Outer Radius of Elbow	[mm]	500
Elbow Angle	[degree]	90

Table 2. Pipe Parameters for Entrance Length

Parameters	Unit	Value
Pressure	[bar]	28.44
Temperature	[°C]	-25
Viscosity	[kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹]	6.095e-05
Density	[kg·m ⁻³]	432
Inlet velocity of Ethylene	[m·s ⁻¹]	2.122e-02
Reynolds Number	[Dimensionless]	37601(Turbulent)

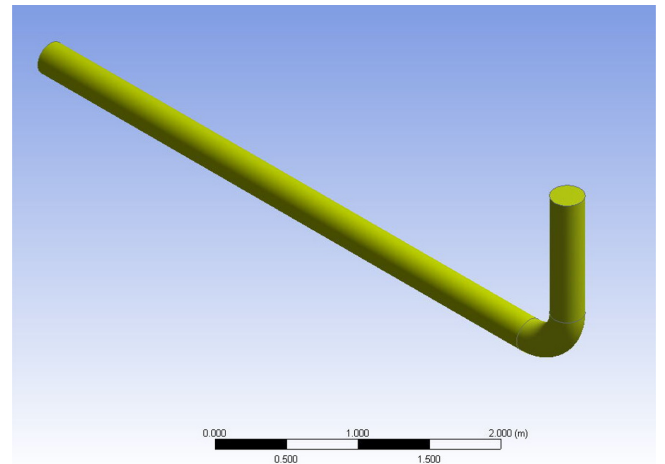


Fig. 1. Pipe Geometry.

계산해보았을 때 난류(turbulent) 유동을 가지므로 Bhatti and Shah의 식을 사용하였다.

$$L_{e,turbulent} = 1.359\text{Re}^{1/4}D \quad [6]$$

계산한 입구 길이와 다른 Geometry들을 Table 1에 나타냈고, 여분으로 사용한 파라미터들을 Table 2에 나타냈다.

2-2. Mesh 구성

단순한 배관 구조이므로 배관 횡단면을 자르는 방식인 sweep method를 사용하여 계산에 직관적이고 속도가 비교적 빠른 hexagonal Mesh를 이용하였다. 배관 곡면은 곡률에 따라 Mesh가

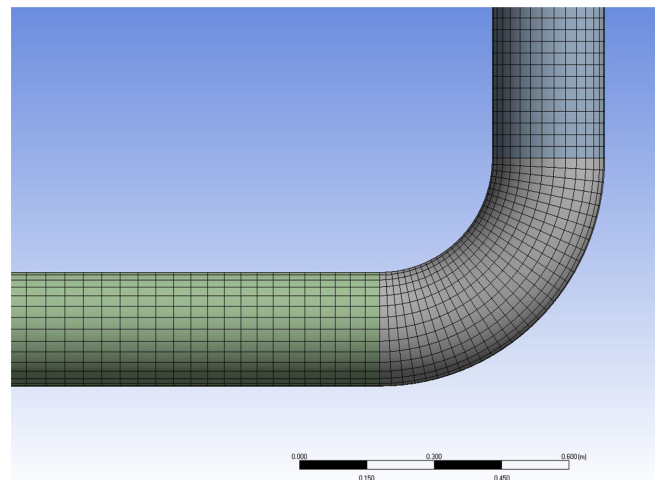


Fig. 2. Pipe Longitudinal section Mesh.

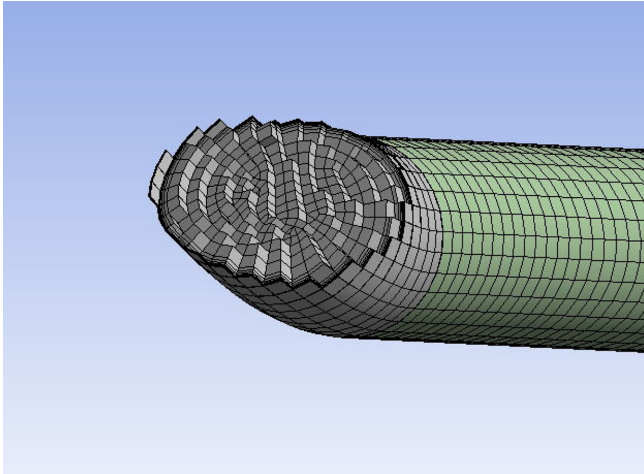


Fig. 3. Pipe Elbow part Mesh.

나뉘지도록 구성하였다. 유체의 흐름은 배관 표면에서 속도 분포가 급격하게 변하고, 사용할 부식 모델은 배관 표면에 관련 있는 모델이므로 배관 표면의 Mesh를 유체역학적 근거로 설정하였다. 표면에 인접한 Mesh의 높이는 y^+ 법(Wall Distance Method)을 사용하였다.

$$C_f = [2\log_{10}(\text{Re}) - 0.65]^{-2.3} \text{ for } \text{Re} < 10^9$$

$$\tau_w = C_f \cdot \frac{1}{2} \rho u^2$$

$$u_{fric} = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$$

$$y^+ = \frac{u_{fric} y \rho}{\mu}$$

사용할 난류 모델인 k-epsilon의 적정 y^+ 범위는 20~200 인데 부식 모델을 위해 최대한 Mesh를 세밀하게 짜기 위해 y^+ 값을 20으로 설정하여 표면 Mesh의 높이 y 를 구하였다.

2-3. CFD 침식 모델 계산

배관 곡면 표면의 침식을 모사하기 위해 먼저 유체의 흐름을 계산하였다. 계산에 사용한 모델은 DPM (Discrete Phase Model)이다. DPM 모델의 경우 유동 안에 연속상과 분산상, 두개의 상이 존재할 때 사용할 수 있다. 유체역학에서의 지배방정식을 풀 때 연속상은 범위의 유동을 계산하는 오일러 방법으로 계산되고, 분산상은 각 입자를 추적하는 라그랑주 방법으로 계산된다.

DPM 모델에서 연속상은 분산상에게 항력(Drag Force)를 유발하

Table 4. Pipe Elbow Erosion Parameters

Parameters	Unit	Value
Particle Diameter	[m]	1.500e-4
Particle inlet velocity	[m·s ⁻¹]	2.122e-3
Coefficient of restitution	[Dimensionless]	0.8
Particle flow rate	[kg·s ⁻¹]	0.02
Shape factor	[Dimensionless]	1 (spherical)
Brinell hardness	[BH]	600 (Carbon steel)
Particle Density	[kg·m ⁻³]	2650 (Sand)

지만 분산상은 거꾸로 연속상에게 영향을 미치지 못한다고 가정한다. 이러한 가정이 유효한 경우는 분산상이 10% 이하를 차지해 큰 영향력이 없을 경우이다. 일반적인 배관에서 불순물이 10% 이상 존재하는 경우는 없으므로 DPM 모델을 사용해도 무방하다.

배관 침식의 경우 열 전달의 효과는 무시할 수 있으므로 열 전달 방정식은 따로 CFD에서 사용하지 않았고, 유체역학상의 각 Mesh에서 계산되는 지배방정식(Governing Equation)을 Table 3과 같이 구성하여 DPM 모델을 계산했다[7]. 난류 모델의 경우 난류 분포의 유동을 계산할 수 있는 k-epsilon 난류 모델을 사용하였다[8,9]. 연속상은 테이터에 명시되어 있던 에틸렌으로 지정했고, 분산상은 침식 효과가 커 침식의 주 원인이 되는 고체 불순물로 지정해서 DPM 모델을 설정을 진행했다.

DPM 모델로 구한 유체의 유동을 침식 모델에 적용시켜 표면의 침식 속도를 구할 수 있다. 본 연구에서는 침식 속도를 구하기 위해 실험적 모델 중 하나인 Tulsa Angle Dependent 모델을 사용하였다. Tulsa Angle Dependent 모델을 사용한 이유는 다른 부식 모델에 비해 식의 계수들이 잘 주어지고, 부식 속도 계산에 필요한 파라미터들을 구하기 비교적 용이하기 때문이다. Tulsa Angle Dependent 모델을 포함한 CFD에 사용한 파라미터 값들을 Table 4에 나타냈다[10].

$$\text{Erosion ratio} = 1.559e^{-6} B^{-0.59} F_s v^{1.73} f(\alpha)$$

$$f(\alpha) = 5.41\alpha - 10.11\alpha^2 + 10.93\alpha^3 - 6.33\alpha^4 + 1.42\alpha^5$$

$$\text{Erosion rate} = \sum_{p=1}^{N_{\text{particles}}} \dot{m}_p \text{Erosion ratio} / A_{\text{face}}$$

3. CFD 결과 및 한계상태함수 분석

3-1. 곡면 침식 CFD 결과 분석

CFD를 통해 배관 곡면에서의 침식 속도와 침식 분포를 얻었다. 배관의 곡면에서는 모래입자들이 직접적으로 배관에 충돌하므로

Table 3. Governing Equations in CFD

Equation of Continuity	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$
Equation of Motion	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \rho \vec{g}$
k-epsilon Model	$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \epsilon$
k-epsilon Model	$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$
Drag Force	$\vec{F}_{\text{drag}} = m_p \frac{18 \rho}{24 \rho_p d_p} C_D = \vec{u} - \vec{u}_p (\vec{u} - \vec{u}_p)$

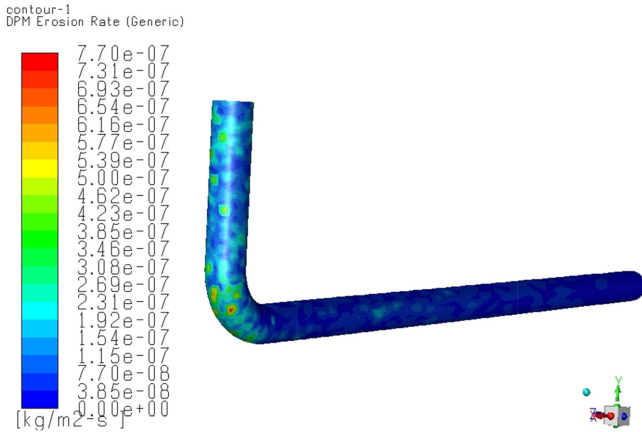


Fig. 4. Pipe Elbow Erosion Rate Result.

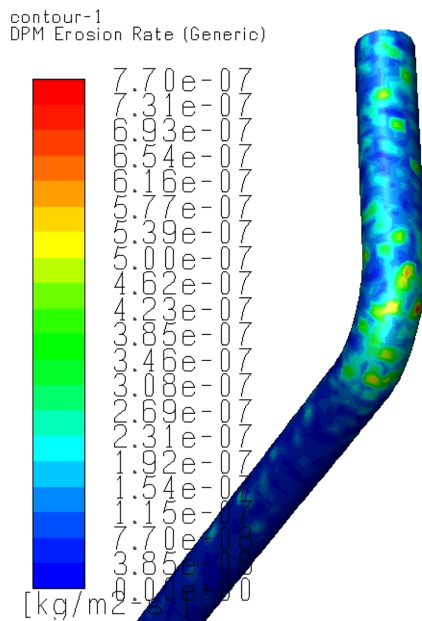


Fig. 5. Pipe Elbow Erosion Rate Result 2.

침식 분포가 많음을 알 수 있고, 곡면 충돌 이후 난류가 심해지므로 곡면 이후의 배관에서도 어느정도 침식이 진행됨을 볼 수 있다. 곡면 이전 직선 배관에서는 난류의 흐름 때문에 모래입자들이 벽면이 부딪혀 일부 침식이 일어났다고 추측 할 수 있다. 추후에 분석할 한계상태함수에서 침식 깊이에 대한 성장 속도가 중요한 요소이므로, 이에 맞게 단위를 Table 5에서 변환하였다.

3-2. 침식 속도 한계상태함수 분석

침식 속도에 대한 한계상태함수는 따로 존재하지 않지만, 부식에 관한 한계상태함수는 존재한다. 부식에 관한 한계상태함수의 경우 일어난 단면과, 부식 깊이를 소실되는 부분이라고 생각하므로 침식

Table 5. Calculate Max Erosion Rate

Item	Unit	Value
Density (Carbon Steel)	[kg·m ⁻³]	7850
Max Erosion Depth Rate	[kg·m ⁻² ·s ⁻¹]	7.697e-07
	[m·s ⁻¹]	9.806e-11
	[mm·yr ⁻¹]	3.092

Table 6. Pipe Burst Parameters

Item	Unit	Value
Mean erosion growth rate	[mm·yr ⁻¹]	1.546
Erosion Length	[mm]	390
Tensile strength	[MPa]	413.7
e ₁ , burst parameter 1	[Dimensionless]	1.04
e ₂ , burst parameter 2	[Dimensionless]	1.469e-3
$\frac{l^2}{D \times t}$	[Dimensionless]	13.83

과 원인만 다를 뿐 계산에 있어서 똑같은 특징을 가진다. 이러한 이유로 부식에 관한 한계상태함수를 이용해 침식 속도에 관하여 분석을 진행하였다. 부식 원인의 한계상태함수에는 누출과 파열의 두가지 모드가 존재한다[12].

$$g_1 = t - d_{max}$$

g_1 은 누출에 관한 한계상태함수이다. g_1 이 0 보다 작을 경우 배관에서 실패가 일어나게 된다. 단순히 부식의 가장 큰 길이가 배관 두께보다 길어져 구멍이 생겨 누출이 일어난다는 한계상태함수이다. 연구를 진행한 해당 배관의 경우 배관 두께가 44 mm 인데 계산한 배관의 침식 속도 최대값을 보면 약 14.2 년에 침식 최대값이 배관 두께와 일치하므로, 14.2 년 이후 배관에 누출이 일어나 실패가 일어날 수 있다.

$$g_2 = t_a - P$$

$$r_a = e_1 r_c + (1 - e_1) r_0 - e_2 \sigma_u \text{ for } \sigma_y > 241 \text{ MPa}$$

$$r_c = r_0 \times \frac{1 - \frac{d_a}{t}}{\frac{d_a}{m \times t}}$$

$$r_0 = 1.8 \frac{t \sigma_u}{D} \text{ for } \sigma_y > 231 \text{ MPa}$$

$$m = \sqrt{1 + 0.6275 \frac{l^2}{D \times t} - 0.003375 \left(\frac{l^2}{D \times t} \right)^2} \text{ for } \left(\frac{l^2}{D \times t} < 5 \right)$$

g_2 은 파열에 관한 한계상태함수로, Leak과 달리 실험적으로 구해진 한계상태함수이다[11]. 연구 대상 배관의 항복 강도가 241.3 MPa의 값을 가졌으므로, 해당하는 범위의 한계상태함수를 사용하였다. CFD의 결과에서 가장 긴 침식 길이를 측정하고, 평균 침식 속도를 최대값의 절반으로 가정하여 한계상태함수가 0 이하가 되는 시간을 찾았다. 27.22 년 이후에 침식이 배관에 burst를 유발할 수 있다는 결과를 얻을 수 있었다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 특정 배관의 곡면에 대하여 침식 속도를 CFD를 통해 계산할 수 있었고, 이를 한계상태함수 식에 대입하여 배관의 수명을 예측해 볼 수 있었다. 계산한 한계상태함수 결과로 배관 점검 주기와 교체 주기를 정하는데 참고 할 수 있을 것이고, 침식 속도를 참고하여 배관 곡면 부분의 두께를 다르게 만들어 배관을 설치 할 수 있을 것이다.

일반적인 외부 부식의 경우 방식에 문제가 생겼을 때, 부식속도

가 0.1~0.20 mm·yr⁻¹ 인데, [12] 본 연구의 시뮬레이션에서 침식은 문헌값의 외부 부식에 비해 아주 큰 수치(3.092 mm·yr⁻¹)를 나타내었다. 이를 보아 조건 여하에 따라 배관 곡면에서 일어나는 침식이 배관 실패에 주요 실패 모드 중 하나인 외부 부식 이상으로 충분히 영향력을 줄 수 있다고 볼 수 있고, 배관 곡면 침식이 배관 시뮬레이션 프로그램들의 정확도를 높이기 위해서 반영해야 할 실패 모드라고 볼 수 있다.

본 연구에서 한가지 배관 사례의 CFD의 소요시간은 16 코어 CPU를 사용했을 때 수렴 여부에 따라 2시간~2일이었다. 시간적 측면에 따라 많은 배관들에 대해서 연구를 진행하기에는 한계가 있지만, 기업에서 운영하는 배관들은 종류와 운영 조건이 한정되어 있으므로 각 배관에 대해 본 논문에서 제시한 방법론으로 침식 모사를 진행하여 배관 실패 모사를 진행하면 실패 주기를 계산할 수 있을 것이다.

감 사

본 연구는 2017년도 산업부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 0667-20170013).

Nomenclatures

A_{face}	: Wall Area [mm ²]
B	: Brinell hardness [BH]
C_D	: Drag coefficient [Dimensionless]
C_f	: Skin friction [Dimensionless]
$C_{1\epsilon}$: Numerical parameter of ϵ [Dimensionless]
$C_{2\epsilon}$: Numerical parameter of ϵ [Dimensionless]
D	: Pipe diameter [mm]
d_a	: Average erosion depth [mm]
d_{max}	: Max erosion depth [mm]
d_p	: Particle diameter [m]
E_{ij}	: Component of rate of deformation
e_1	: Burst model error factor 1 [Dimensionless]
e_2	: Burst model error factor 2 [Dimensionless]
\vec{F}_{drag}	: Drag force [kg·m·s ⁻²]
F_s	: Particle shape coefficient [Dimensionless]
\vec{g}	: Gravitational acceleration [m·s ⁻²]
k	: Turbulent kinetic energy [m ² ·s ⁻²]
l	: Erosion length [mm]
m	: Folias factor [Dimensionless]
m_p	: Mass of the particle [kg]
\dot{m}_p	: Particle flow rate of mass [kg·s ⁻²]
P	: Operating Pressure [bar]
Re	: Reynolds Number [Dimensionless]
r_a	: Estimated Pressure resistance including model error [MPa]
r_c	: Calculated pressure resistance [MPa]
r_0	: Pressure resistance for perfect pipe [MPa]
t	: Pipe wall thickness [mm]
u	: Free stream velocity [m·s ⁻¹]
u_{fric}	: Friction Velocity [m·s ⁻¹]

u_i	: Velocity component in corresponding direction [m·s ⁻¹]
\vec{u}	: Fluid velocity vector [m·s ⁻¹]
\vec{u}_p	: Particle velocity vector [m·s ⁻¹]
v	: Relative particle velocity [m·s ⁻¹]
\vec{v}	: Velocity vector [m·s ⁻¹]
y	: Wall Distance [m]
y^+	: Y+ value [Dimensionless]
α	: Impact angle [Degree]
ϵ	: Dissipation [m ² ·s ⁻³]
μ	: Viscosity of fluid [kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹]
ρ	: Density of fluid [kg·m ⁻³]
ρ_p	: Density of the particle [kg·m ⁻³]
τ_w	: Wall shear stress [kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹]
μ_t	: Eddy viscosity [kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹]
σ_k	: Numerical parameter of k [Dimensionless]
σ_ϵ	: Numerical parameter of ϵ [Dimensionless]

References

1. Moser, A. P. and Folkman, S. L., *Buried pipe design*, New York: McGraw-Hill., p. 57 (2001).
2. Roberge, P., *Handbook of Corrosion Engineering 2/E*. McGraw Hill Professional (2012).
3. Amirat, A., Mohamed-Chateaneuf, A. and Chaoui, K., "Reliability Assessment of Underground Pipelines Under the Combined Effect of Active Corrosion and Residual Stress," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **83**(2), 107-117(2006).
4. Ahammed, M., "Probabilistic Estimation of Remaining Life of a Pipeline in the Presence of Active Corrosion Defects," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **75**(4), 321-329 (1998).
5. Edwards, J. K., McLaury, B. S. and Shirazi, S. A., "Modeling Solid Particle Erosion in Elbows and Plugged Tees," *Transactions-american Society of Mechanical Engineers Journal of Energy Resources Technology*, **123**(4), 277-284(2001).
6. Bhatti, M. S. and Shah, R. K., "Turbulent and Transition Flow Convective Heat Transfer in Ducts," *Handbook of Single-phase Convective Heat Transfer*, 4-1(1987).
7. Bird, R. B., "Transport Phenomena," *Applied Mechanics Reviews*, **55**(1), R1-R4(2002).
8. Mansour, N. N., Kim, J. and Moin, P., "Near-wall k-epsilon Turbulence Modeling," In *6th Symposium on Turbulent Shear Flows*, pp. 17-4 (1987).
9. Launder, B. E. and Spalding, D. B., "The Numerical Computation of Turbulent Flows," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **3**(2), 269-289(1974).
10. Zhang, Y., Reuterfors, E. P., McLaury, B. S., Shirazi, S. A. and Rybicki, E. F., "Comparison of Computed and Measured Particle Velocities and Erosion in Water and Air Flows," *Wear*, **263**(1), 330-338(2007).
11. Brown, M., Nessim, M. and Greaves, H., "September Pipeline defect assessment: deterministic and probabilistic considerations," In *Second International Conference on Pipeline Technology, Ostend, Belgium, September*. (1995).
12. Oil, C. S. A., "Gas Pipeline Systems, CSA standard Z662-07,"

- Mississauga, Ontario, Canada: Canadian Standard Association(2007).
13. Lee, Y., Jung, I., Na, J., Park, S., Kshetrimayum, K. S. and Han, C., "Analysis on Thermal Effects of Process Channel Geometry for Microchannel Fischer-Tropsch Reactor Using Computational Fluid Dynamics," *Korean Chemical Engineering Research*, **53**(6), 818-823(2015).
14. Setarehshenas, N., Hosseini, S. H., Esfahany, M. N. and Ahmadi, G., "Three-dimensional CFD Study of Conical Spouted Beds Containing Heavy Particles: Design Parameters," *Korean Journal of Chemical Engineering*, **34**(5), 1541-1553(2017).